

Làser de femtosegons en forma de 8 basat en EDFA i controlat per Arduino

Victor Chausse, Judith Medina, Albert Miguel, Bernat Molas, Joan Sendra i Alfredo Vidal

— — —
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

En els darrers anys, els làsers han esdevingut un instrument cabdal per al desenvolupament de la recerca en molts àmbits. Per exemple, en microscòpia, l'ús del làser en noves tècniques que fan ús de la fluorescència ha permès fer un salt qualitatiu en l'obtenció d'imatges. Generalment, la majoria de làsers utilitzats han estat d'estat sòlid, però en l'actualitat s'està treballant en làsers menys complexos, portables i econòmics: són els làsers basats en fibra. L'objectiu d'aquest projecte és dissenyar i construir un làser de fibra òptica que produeixi polsos de l'ordre dels femtosegons en el rang dels 1550 nm. El *paper* està estructurat de manera que primer fem una anàlisi general de les aplicacions del làser en l'estudi de cèl·lules canceroses, concretament a l'hora d'obtenir imatges mitjançant microscòpia no lineal. A partir d'aquesta anàlisi obtenim les especificacions que ha de complir el nostre làser. Tot seguit, n'expliquem els principis físics que governen el làser i el seu disseny. Posteriorment, modelarem la resposta del làser i tractarem el control de temperatura mitjançant Arduino. Per últim, mostrem alguns dels resultats obtinguts.

I. ESTAT DE L'ART I OBJECTIUS

Des que es va inventar el làser, l'any 1960, se'l va qualificar de solució a l'espera d'un problema. Des de llavors, s'han tornat omnipresents i actualment se'ls fa servir en milers d'aplicacions de camps molt variats, com l'electrònica de consum, la tecnologia de la informació, la investigació científica, la medicina, la indústria i el sector militar.

Un àmbit de la medicina en què els làsers han tingut un protagonisme creixent en els últims anys és en la teràpia del càncer. En poder concentrar tanta llum en un punt, es tracta d'una eina molt poderosa i versàtil: poden tallar, subministrar calor, acoblar-se amb endoscòpis i utilitzar-se en microscopis. El làser que desenvoluparem, concretament, servirà per aquest últim propòsit, el d'obtenir imatges en microscopi.

A. Avenços recents en imatge de dos fotons[1]

El TPM és un tipus de microscòpia que es val d'efectes òptics no lineals induïts per l'excitació de dos fotons. S'utilitza en l'infraroig proper, reduint l'absorció per part de teixit i d'aigua, amb una profunditat de penetració propera a 1 mm per teixits biològics. A més, redueix el *photo-bleaching*, el *photo-damage* i la toxicitat en confinar espacialment l'excitació fluorescent. Aquestes propietats l'han fet molt interessant per aplicacions biomèdiques, ja que ha permès estudiar sistemes in vivo.

Altres efectes no lineals s'han usat conjuntament amb el TPM, com la generació de segon harmònic (SHG), la generació de suma-freqüència (SFG) i l'*scattering* de Raman Anti-stokes coherent (CARS). En la imatge per TPF (fluorescència de dos fotons), es produeix un procés de dos fotons, quan una molècula absorbeix simultàniament dos fotons, l'energia de cadascun dels quals és la meitat de l'energia necessària per excitar la molècula. Posteriorment, emet energia en forma d'un fotó de fluorescència,

un fotó de fosforescència o un fotó SHG. Les molècules a excitar són tints fluorescents, proteïnes fluorescents o nanopartícules.

1. Microscopia de dos fotons avançada

El TPM s'implementa típicament en un microscopi d'escaneig làser equipat amb un làser de polsos ultraràpids, que es focalitzen totalment en un punt concret del pla focal, i després s'escaneja al llarg i ample de la mostra. Els fotons de fluorescència són detectats per fotodetectors, com tubs de fotomultiplicació (PMTs) o fotodiodes d'allau (APDs). Aquests senyals són transformats en píxels individuals d'una imatge. Pel que fa al sistema làser, el làser és de polsos d'alta potència ultraràpids, per tal d'induir eficientment efectes òptics no lineals. Se solen utilitzar làser d'estat sòlid en mode-locking, com ara Ti:Sapphire, amb 1 W de potència de pic i una longitud d'ona al voltant dels 800 nm, però ajustable entre els 690 i 1050 nm. Les tendències es troben actualment en augmentar la longitud d'ona per penetracions més profundes en el teixit i la mida compacta per aplicacions portàtils. També s'està investigant en sistemes de làsers compactes com ara els basats en diodes làser semiconductors (permeten polsos de picosegons de manera estable) o en fibra òptica. Pel que fa a l'escàner entre les noves tècniques, hi trobem l'ús de deflectors acusto-òptics, que permeten canviar l'angle de deflexió del feix làser o l'escaneig paral·lel amb múltiples feixos.

En conclusió, la microscòpia de dos fotons (TPM) ha revolucionat la recerca biomèdica, permetent obtenir imatges en fluorescència de molècules de manera no destructiva i amb alta resolució, in vivo i en temps real.

B. Avenços recents en làsers de fibra per a microscòpia no lineal [2]

Els làsers d'estat sòlid de femtosegons segueixen sent la font principal de llum per aplicacions de microscòpia no lineal. No obstant, els làsers basats en fibra ofereixen també característiques importants per l'obtenció d'imatges biològiques i biomèdiques. Els avenços recents desenvolupen fonts amb potencial per realitzar instruments robustos i més econòmics.

Mitjançant microscòpia òptica es poden obtenir imatges amb resolució espacial inferior al micròmetre. En les dues últimes dècades, s'ha descobert que els polsos ultracurts de llum es poden fer servir en multitud de modalitats d'obtenció d'imatge biomèdica. Requereixen alta potència de pic i focalització, per a poder governar processos òptics no lineals com l'absorció de multifotons en molècules utilitzades com a etiquetes fluorescents.

El 1990 es va desenvolupar la microscòpia de dos fotons (TPM), que ha permès el desenvolupament de diversos indicadors fluorescents. Més endavant, va arribar la microscòpia de multifotó i la de generació d'harmònics. El descobriment de la lent de Kerr pel *mode-locking* en làsers de safir dopats amb titani va ser crític per la proliferació de microscòpia no lineal. Els làsers estàndard de Ti:Sapphire són sintonitzables en un rang de 700 a 1000 nm, amb energies de pols de 20-30 nJ, duracions de pols de 100 fs, repeticions de 100 MHz i potència mitjana de 2 W. Es tracta de grans làsers, i es per aquest motiu que val la pena desenvolupar altres instruments estables, de fàcil ús, més barats i compactes.

1. Avenços en oscil·ladors en fibra de femtosegons d'alta energia.

Els làsers de fibra són atractius per aplicacions d'imatge per les raons següents:

- El medi dels làsers de fibra elimina la necessitat d'alineació òptica precisa, permet llargues cavitats (i per tant, amb baixa repetició) i assegura una bona qualitat del feix.
- El guany del medi és eficient i pot proporcionar amb facilitat la potència necessària.
- Els làsers en fibra estan especialment indicats pel seu acoblament amb instruments endoscòpics.

No obstant, també té inconvenients, com la impossibilitat de regular la longitud d'ona. Per aquests motius els làsers d'estat sòlid encara dominen el camp de la microscòpia no lineal. A pesar d'aquests inconvenients, actualment es creu que els làsers de fibra de femtosegons poden igualar i fins i tot millorar les característiques dels làsers d'estat sòlid, encara que a una única longitud d'ona. La gran versatilitat de la fibra, en contraposició als làsers d'estat sòlid, fa que sigui potencialment possible l'aplicació en

altres àmbits que ara no es preveuen. El primer làser en fibra en arribar a la potència d'un Ti:Sapphire estàndard fou un làser de solitó dissipatiu, consistent en fibra dopada amb Yb. A una longitud d'ona de 1050 nm, es va utilitzar en microscòpia no lineal, per exemple, per obtenir imatges de neurones i vasculatura a profunditats de gairebé 1 mm.

2. Línies d'investigació actuals en microscòpia de multifotons (MPM)

El teixit dispersa la llum de manera efectiva, fent complicat obtenir imatges d'una profunditat relativament petita. La microscòpia òptica ha permès arribar fins a uns 0.5 mm, de manera que només podem parlar de microscòpia superficial. L'MPM, per contra, permet l'anàlisi *in vivo*, amb tots els avantatges que això comporta. Per exemple, el TPM ofereix unes profunditats de penetració de dues o tres vegades majors que les de microscòpia confocal lineal.

La profunditat d'imatge en TPM ve limitada per la ràtio senyal-fonts de la distribució de fluorescència. Aquest límit sol ser d'unes 5 o 6 vegades la longitud d'atenuació. Fer servir longituds d'ona més gran redueix la dispersió del teixit, però alhora n'augmenta l'absorció. Aquest *trade-off* defineix la longitud d'ona òptima per a la longitud d'ona d'excitació. Es pot veure com el rang òptim es troba entre els 1300 i 1700 nm.

No obstant, per longituds d'ona de l'ordre de 1700 nm, molts fluoròfors endògens (per exemple, el NADH) es tornen inaccessibles, fins i tot amb excitació de tres fotons. Encara que això pot limitar les aplicacions clíniques incloent humans, longituds d'ona grans són beneficioses per imatge extrínseca d'indicadors, ja que eliminen el background fluorescent, obtenint així una millora del contrast de la imatge.

Les fonts ideals per MPM de teixit profund tenen una energia molt superior a 10 nJ, amb polsos de femtosegons a la finestra entre els 1300 i 1700 nm, amb taxes de repetició tals que no escalfin massa la mostra. Tanmateix, els làsers de fibra no permeten variar la longitud d'ona més que en uns pocs nanòmetres mitjançant el guany dels dopants, i això restringeix les aplicacions en biologia i medicina.

No obstant, hi ha una manera de passar d'una longitud d'ona més petita a una de més gran: es coneix com soliton self-frequency shift (SSFS). La combinació de MPM amb SSFS és ideal per aplicacions biomèdiques, ja que permet un rang de longituds d'ona entre 1600 i 2200 nm.

En conclusió, encara que els làsers d'estat sòlid de femtosegons segueixen sent la font principal de llum per aplicacions de microscòpia no lineal, els làsers basats en fibra ofereixen també característiques importants per l'obtenció d'imatges biològiques i biomèdiques. Els avenços recents desenvolupen fonts amb potencial per realitzar instruments robustos i més econòmics. Els làsers en les finestres d'excitació d'altres longituds d'ona, combinades

amb excitació de 3 fotons, potenciarien l'obtenció d'imatge de teixit profund.

C. Recerca IBEC (Institut de Bioenginyeria de Catalunya)

Un nou descobriment sobre com es mouen les cèl·lules dins del cos podria proporcionar als científics informació decisiva sobre mecanismes de malalties com la disseminació del càncer o l'obstrucció de les vies respiratòries causada per l'asma.

Sota la direcció d'investigadors de l'Institut de Bioenginyeria de Catalunya (IBEC) i de l'Escola de Salut Pública de Harvard (HSPH), els científics han descobert que les cèl·lules epitelials es mouen en grup, impulsades per forces tant des del seu interior com des de les cèl·lules properes per omplir qualsevol espai buit que troben. Mitjançant una tècnica anomenada microscòpia d'estrès en monocapa, que ells mateixos han inventat, han mesurat les forces que afecten una única capa de cèl·lules epitelials en moviment, descobrint com les cèl·lules s'obren pas per ocupar l'espai buit.

Aquesta nova troballa pot ajudar a comprendre millor la conducta de les cèl·lules i avaluar fàrmacs que poden influir en aquesta conducta en diverses malalties complexes, com el càncer. Per exemple, en carcinomes, que representen el 90% de tots els càncers i impliquen cèl·lules epitelials, la nova informació sobre el moviment cel·lular podria millorar el coneixement de com migren les cèl·lules canceroses pel cos.

Per a aconseguir aquests resultats, han utilitzat un microscopi d'estrès en monocapa, desenvolupat a l'IBEC, que es basa en un làser de fibra dopat amb iterbi (Yb). Mitjançant òptica no lineal, han pogut monitoritzar el moviment de les cèl·lules i les forces que provoquen. Aquest làser es troba en el rang dels 1000 nm, però té molt poca profunditat de penetració. Per tant, podem dir que el que s'obté és un mapa en dues dimensions.

Actualment, s'està duent a terme una millora en la tècnica per anar un pas més enllà. Es tracta d'aconseguir imatges en 3 dimensions, que permetin un estudi més precís de la migració de cèl·lules, amb les seves possibles aplicacions biomèdiques posteriors. Per tal de desenvolupar una tècnica que ens mostri la tercera dimensió, caldrà una font de llum diferent a la utilitzada fins al moment. És el moment de recordar el punt 1, on s'estableixen els avenços recents en làsers de fibra per a microscòpia no lineal. Mitjançant una combinació de microscòpia de 2 i 3 fotons, a l'IBEC estan desenvolupant una tècnica que proporcionï imatges en 3 dimensions. Cal que en aquestes imatges hi hagi un contrast important entre els components a analitzar i el fons. És per aquest motiu que també s'està desenvolupant un mecanisme que permeti excitar diversos fluoròfors alhora; així, a partir d'un espectre ampli de radiació, s'ha de separar en les diferents longituds d'ona que exciten els diferents fluoròfors, per tal d'obtenir una imatge del conjunt total en temps real.

L'apreciació en temps real és important, ja que mitjançant altres tècniques es pot aconseguir un resultat semblant. Per exemple, sobre una mostra de cèl·lules mortes, utilitzant dos tints diferents per diferenciar diferents estructures cel·lulars, podríem il·luminar primer a una longitud d'ona, desmar la imatge, il·luminar amb la segona longitud d'ona i desmar la imatge. Com la mostra no s'ha mogut, podem superposar ambdues imatges de manera que obtinguem el conjunt global. Tanmateix, per a l'aplicació que ens ocupa, es realitza *in vivo*: s'estudia el sistema vascular d'embrions de pollastre. Per tant, en tenir una mostra viva, ja no podem superposar imatges, ja que es mouen de lloc. És per aquest motiu que hauríem d'il·luminar alhora la mostra amb totes les longituds d'ona que provoquin la fluorescència.

D. Objectius

L'objectiu és desenvolupar un làser de fibra dopada amb Erbi, que emeti a una longitud d'ona de 1550 nm, amb una duració de polsos de picosegons o femtosegons, per tal d'utilitzar-lo per estudiar la migració de cèl·lules. La raó de 1550 nm és que ens permetrà arribar a una profunditat superior a la que s'arriba amb els làsers desenvolupats actualment a l'IBEC. En tractar-se d'un projecte de col·laboració amb l'IBEC, gràcies a la investigadora Dobryna Zalvidea, voldríem que el làser servís per a l'obtenció d'imatges, com un prototip que fos un pas més en els límits de la recerca actual, de limitació de profunditat i versatilitat, compactabilitat i preu dels làsers.

II. PRINCIPIS DE FUNCIONAMENT I DISSENY

Un làser basa el seu funcionament en la replicació de fotons dins una cavitat[3]. Un element indispensable és el medi amplificador, capaç d'emetre fotons amb les mateixes característiques que els fotons incidents. D'aquesta manera es pot extraure en feix de llum de la cavitat coherent i monocromàtic (fins a certa extensió, com es veurà més endavant). En el cas del làser que estem tractant, la cavitat està construïda a partir de fibra òptica, i el medi amplificador està format per fibra dopada amb àtoms d'Erbi (Er^{+3}).

L'amplificador utilitzat per al projecte s'anomena EDFA (*Erbium-doped Fiber Amplifiers*) i disposa d'uns nivells energètics quantitzats (Fig. 1), proporcionats pel dopant. Per a l'aplicació que estem tractant, únicament ens fixarem en els tres primers nivells (*three-level system*)[4, p. 131-149].

Introduint un bombeig en la fibra s'aconsegueix excitar els àtoms d'Erbi (mitjançant l'absorció de fotons) de l'estat fonamental ($^4I_{11/2}$) al segon estat excitat ($^4I_{11/2}$). Per simple relaxació, l'àtom decau ràpidament fins al primer estat excitat ($^4I_{13/2}$) sense emetre radiació. En aquest, un fotó incident (amb energia menor que la de

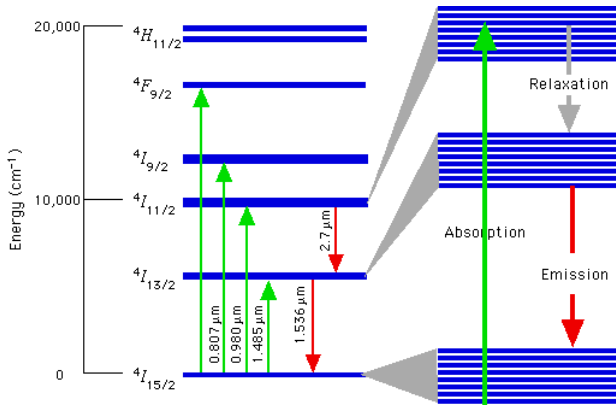


Figura 1. Nivells energètics de la fibra dopada amb Erbi (EDFA)[5].

bombeig) pot interaccionar amb l'àtom excitat i donar lloc a un segon fotó amb les mateixes característiques que el primer. Aquest procés, anomenat emissió estimulada, retornarà l'àtom al seu estat fonamental. Els processos d'absorció i emissió de fotons són totalment probabilístics, i estan governats pels coeficients d'Einstein.

Com es pot deduir de la mateixa figura, el díode làser utilitzat per al bombeig ha d'operar a 980 nm, i les longituds d'ona que la fibra dopada és capaç d'amplificar van dels 1530 nm als 1560 nm, aproximadament. Parlem d'un rang de freqüències i no d'una única freqüència perquè les energies no estan perfectament definides, sinó que tenen un cert gruix.

A part d'una cavitat i un medi d'amplificació, ens fa falta algun element extra per a poder aconseguir un làser polsat de femtosegons. No hi ha un sol mètode per obtenir puslos de llum. En el làser del projecte, els polsos s'obtidran dissenyant una cavitat que aprofiti l'efecte no lineal de la *self modulation* per a aconseguir un *mode-locking*.

L'auto-modulació es basa en l'efecte *Kerr*, que modifica la fase de l'ona electromagnètica en funció de la seva intensitat i la distància recorreguda segons

$$\phi = \frac{2\pi n_2 L |E|^2}{\lambda} \quad (1)$$

on n_2 és el coeficient kerr i L la longitud recorreguda.

Inicialment es van contemplar dos dissenys, ambdós inclosos en el grup de làsers basats en el *passive mode-locking*, sense utilitzar senyals externes al propi làser. El primer disseny feia ús d'absorbents saturables, en aquest cas grafè, com a mitjà de generació dels polsos, però va ser descartat per la dificultat en la manipulació de l'absorbent i en la seva obtenció. El segon disseny i definitiu fa ús d'un efecte no lineal conegut com efecte Kerr combinat amb una estructura adequada, *figure-of-eight*, per tal d'aconseguir el conegut fenomen de *self mode-locking*.

A. Funcionament

El sistema de bombeig a 980nm és dissenyat per ser controlat mitjançant el microcontrolador arduino amb l'objectiu de regular la temperatura, intensitat de bombeig i característiques com la forma de la senyal d'entrada, que pot ser convenient modificar per afavorir la inicialització de la pulsació o d'altres. Fent ús d'un *isolator* per tal de prevenir danys per possibles reflexions internes no desitjades i a través d'un WDM (*Wavelength Divisor Multiplexer*) que permet combinar o separar senyals de diferents longituds d'ona per ser transmeses de forma conjunta, la llum de bombeig entra al bucle i excita l'EDFA per tal d'aconseguir emissió estimulada al voltant dels 1550nm. Durant el procés d'arrencada, l'emissió espontània, el bombeig polsat i certes inestabilitats inicials donen lloc a la generació d'uns polsos incipients de llarga durada que seran dividits i escurçats posteriorment. En cas de no aconseguir la pulsació inicial desitjada es pot fer ús d'una senyal de referència externa generada amb *Active Q-switching*, tot i que no ha de ser necessari.

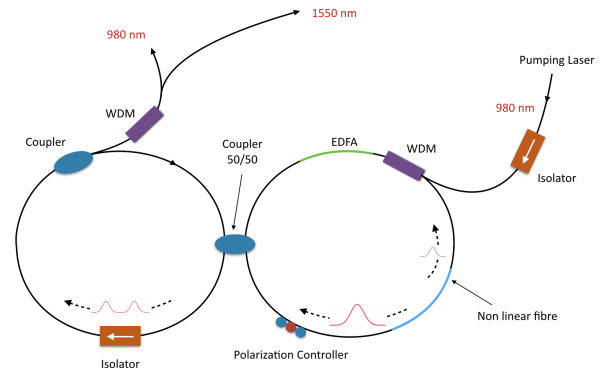


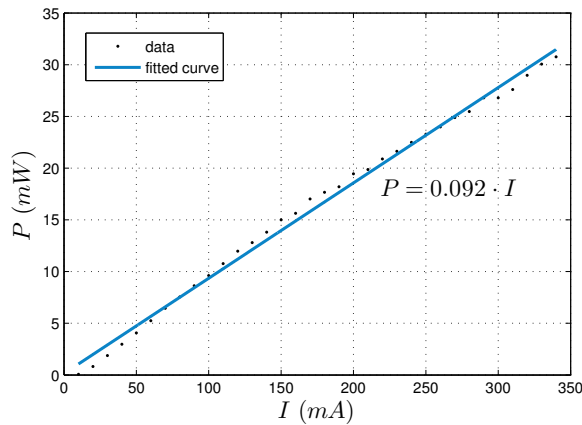
Figura 2. Representació esquemàtica del làser implementat, en la qual podem distingir tres parts principals: el NALM (*Non-linear amplifying loop mirror*) i el sistema de bombeig a la dreta i el bucle d'assistència a l'esquerra, per on s'extreu el feix làser per poder ser utilitzat.

Si analitzem el recorregut d'un primer pols, aquest entra al NALM per mitjà d'un *coupler* 50/50 on la senyal es divideix en dos polsos que recorren el NALM en direccions contràries. El pols que viatja en sentit horari (*cw*) i que entra en primer lloc a la fibra d'erbi (col·locada de forma asimètrica en el laç), és amplificada abans que la que viatja en sentit contra-horari (*ccw*) i per tant acumula un major retard de fase induït per la no linearitat de la fibra utilitzada, l'efecte Kerr, resultant en una diferència de fase entre els dos polsos (*cw* i *ccw*) en el moment que es retroben al *coupler*, on han d'interferir. Un controlador de polarització és el responsable de corregir el canvi no desitjat en la polarització sofert dins del laç per tal d'optimitzar la interferència en l'acoblador, que donarà com a resultat polsos dobles (o múltiples) a la sortida sempre que la intensitat del pols original sigui prou alta.

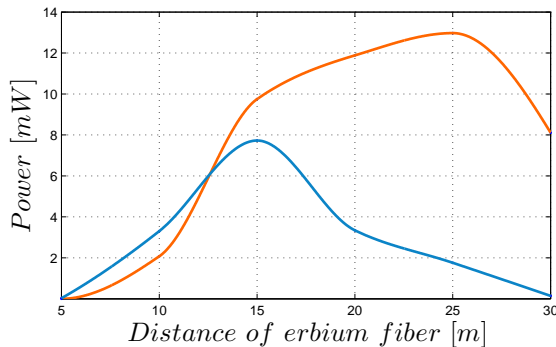
Llavors, els dos impulsos surten de la NALM i viatgen *cw* (assegurat per mitjà de l'aïllador) en el circuit d'assistència, on s'extreu part de la intensitat del làser per a ser explotada en l'aplicació desitjada. A continuació, els polsos tornen a la NALM i el procés de divisió es porta a terme una vegada i una altra fins a l'aparició dels primers factors limitants.

B. Detalls Tècnics

Els criteris de disseny per a tots els paràmetres a ajustar es basen en les limitacions dels recursos disponibles i en procurar obtenir la màxima eficiència tot compensant els efectes no desitjats. D'aquesta manera, ha estat necessària la caracterització dels principals elements que conformen el làser. Es disposa d'una làser de bombeig capaç de donar un màxim de potència de 25 – 30mW tal i com es mostra en la següent caracterització

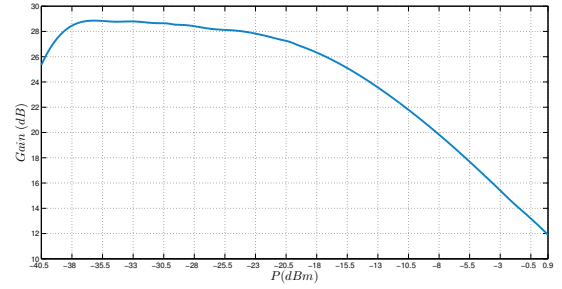


on es representa la potència generada en funció de l'alimentació de la font, característica que és útil a l'hora de fer el control mitjançant arduino. Tenint en compte aquesta potència no gaire elevada, es decideix utilitzar el màxim que es capaç de donar el bombeig i es troba l'emissió del medi d'amplificació EDFA en funció de la seva llargada



on es distingeix l'emissió en el sentit del bombeig (en blau) davant l'emissió en sentit contrari al bombeig (en taronja). Ja que es troba que per al màxim bombeig la longitud de fibra que aconsegueix donar una màxima emissió a 1550nm es la de 15m s'opta per utilitzar aques-

ta longitud d'EDFA per tal d'optimitzar recursos i evitar atenuacions innecessàries, i es procedeix a caracteritzar l'amplificació d'aquesta fibra utilitzant els 30mW de bombeig en funció de la potència de la senyal incident



Extrapolant el comportament lineal (en dB/dBm) per a potències altes podem concloure que el nostre medi serà capaç d'amplificar polsos amb potències inferiors a 15 – 16dBm, factor que serà limitant per tal d'aconseguir polsos amb amplituds reduïdes.

Seguint el mateix principi de minimitzar les pèrdues i optimitzar el material disponible, el bucle d'assistència ha estat pensat per ser tan curt com sigui possible tot permetent la inclusió del *coupler* de sortida (0.2/0.8) i del *isolator*. Pel que fa a la resta, s'ha d'indicar que la fibra utilitzada en el muntatge ha estat la fibra estàndard per comunicacions òptiques (smf g.652) i que totes les connexions han estat ideades per ser dutes a terme mitjançant la fusió de les fibres en una versió definitiva per tal de reduir al mínim qualsevol tipus de pèrdua.

C. Factors Limitants

Com s'ha esmentat anteriorment, el procés de divisió i escurçament dels polsos presenta certes limitacions; tal i com és d'esperar, no es poden obtenir polsos tan curts com desitgem. Un dels primers factors limitants és el fenomen de la dispersió causada per la fibra, que pot arribar a ser un problema si s'empren trams de fibra molt llargs, de l'ordre de les desenes de quilòmetres en el cas de la fibra estàndard, però que té fàcil solució amb la combinació de fibres amb GDD (*Group Dispersion Delay*) positiu i negatiu, que eixamplen i comprimeixen els polsos, respectivament. Aquest efecte, en principi no desitjat pot ser útil si es treballa amb làsers que presentin pics de potència elevats, ja que una dispersió previa a l'amplificació al EDFA (disminuint la potència de pic) pot evitar d'anys en el medi amplificador i es pot recomprimir fàcilment a la sortida (*Chirped-pulse Amplification technique*). Tot i així, amb la potència de bombeig de que es disposa i la longitud de fibra utilitzada (no superior als 3Km), no ens hem de preocupar en excés per aquest efecte.

Existeix un factor que no és fàcil de quantificar ni de predir i que està relacionat amb la propagació dels polsos per la fibra. La interacció i superposició dels diferents polsos que viatgen dins el buit pot donar lloc a interferències no desitjades que empitjorin la periodicitat

del polsat arribant a fer el sistema inestable o caòtic en els casos més greus.

No obstant això, el factor final i principal limitant que no podem resoldre és la limitació de l'ample de banda espectral. Necessitem un espectre amb un ample de banda determinat per tenir una resolució de temps fina, és a dir, per a polsos gaussians i seguint el principi d'incertesa

$$\Delta\omega\Delta t \geq 0.441 \rightarrow \Delta t \geq \frac{0.441}{\Delta\omega} = \frac{0.441}{2\pi c} \left(\frac{\lambda_{max}\lambda_{min}}{\lambda_{max} - \lambda_{min}} \right)$$

Però, l'ample de banda ve marcat pel rang de freqüències que el medi amplificador és capaç d'amplificar, que en aquest cas és de $1530nm$ a $1560nm$ i com a conseqüència la durada mínima teòrica que podem aconseguir és de $20fs$, tot i que no s'espera obtenir polsos de durada inferior als $200fs$.

III. MODELAT DEL COMPORTAMENT DEL LÀSER

Una vegada explicats els diferents principis físics que regeixen el comportament de les diferents parts del làser i planejat una implimentació en figura de 8 passem a modelitzar matemàticament el comportament del NALM per tal d'observar com interfereixen els dos polsos viatjant a través d'ell (cw i ccw) quan arriben de nou al *coupler*. El NALM es comporta com un mirall amb un reflectivitat dependent de la potència d'entrada. Primerament, el pols entra en el NALM a través del *coupler*. Les sortides del *coupler* segueixen les següents equacions

$$E_3 = \sqrt{1-k}E_1 + i\sqrt{k}E_2 \quad (2)$$

$$E_4 = i\sqrt{k}E_1 + \sqrt{1-k}E_2 \quad (3)$$

On E_i són els camps als ports d'entrada (1 i 2) i sortida (3 i 4). En el nostre cas, com hem inclòs un *isolator* en l'altre *loop*, només tindrem un entrada a través de E_1 ($E_2 = 0$). El pols sortint pel port 3 passarà primer per una etapa d'amplificació i després es propagarà per la fibra standard sota l'efecte *kerr*, la dispersió i les pèrdues de la fibra. De moment, despreciarem aquests dos últims efectes doncs no canvien el comportament com a mirall del *loop*. Així doncs, l'efecte no lineal afegirà una fase ϕ al pols en el domini temporal segons l'equació 1. Aquesta fase provoca un eixamplament de l'espectre però no del pols en el domini temporal permetent un escurçament de la durada del pols. Com el pols sortint del port 2 passa per l'etapa d'amplificació després de propagar-se per la fibra *standard*, l'efecte no lineal serà menor doncs aquest depèn de la intensitat. Després de propagar-se els dos pols tindrem

$$E3 = G\sqrt{1-k}E_{in} \cdot \exp\left(\frac{2\pi n_2 L |G\sqrt{1-k}E_{in}|^2}{\lambda}\right) \quad (4)$$

$$E4 = G\sqrt{k}E_{in} \cdot \exp\left(\frac{2\pi n_2 L |E_{in}|^2}{\lambda}\right) \quad (5)$$

amb G el guany de l'amplificador (EDFA). A continuació cal fer el canvi $E_3 = E_4^*$ i $E_4 = E_3^*$ i substituir en les equacions (2) i (3) invertides per a obtenir $E_2 = E_{out}$. Aquest canvi és degut a que els diferents pols arriben en els ports dels couplers amb direcció contrària. Si es duen a terme aquestes operacions es pot arribar al resultat[11]:

$$|E_{out}|^2 = |E_{in}|^2 [1 - 2k(1-k)(1 + \cos(\Delta\theta))] \quad (6)$$

$$\Delta\theta = 2\pi n_2 L(1-k-Gk) \frac{|E_{in}|^2}{\lambda} \quad (7)$$

Així doncs, podem calcular fàcilment la transmissivitat del *loop* dividint la sortida per l'entrada. Utilitzant una amplificació de 28 dB, $n_2 = 3.2 \cdot 10^{-20} m^2/W$, una àrea efectiva de $50\mu m^2$, una longitud de fibra de 2000 m i $\lambda = 1550nm$ obtenim els resultats de la figura 3. Com es pot veure, si es disposa d'una etapa d'amplificació els efectes de la no linearitat augmenten i no es necessita utilitzar un *coupler* amb $k \neq 0.5$ (a part de poder entrar potències inicials molt més baixes).

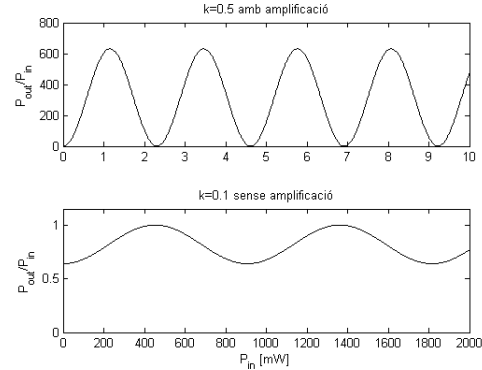


Figura 3. Transmissivitat d'el NALM per a diferents guanys i constants del *coupler*

Així doncs, a partir del gràfic es pot veure que si a l'entrada del coupler no hi ha una potència aproximadament més elevada que un miliWatt el pols no es dividirà ja que no s'arriba a superar el primer màxim de la corba d'amplificació. A la següent figura es pot veure com entrant inicialment un pols gaussià de 8 mW el pols surt dividit en quatre polsos més petits. En la següent iteració (agafant la sortida de l'anterior iteració com a entrada) el pols ja s'ha dividit passat el límit de resolució de la figura. Aquest fet es degut a l'amplificació. Després de la iteració el pols surt amplificat fins els Watts, fet que provoca que el pols es divideixi moltes més vegades. Així doncs, si s'espera suficient temps s'hauria de poder arribar a polsos fins i tot més petits que els femtosegons. Com ja s'ha dit amb anterioritat, hi ha una límit imposat per l'ample de banda de l'amplificador i la dispersió. A més a més, l'EDFA no pot donar més d'una determinada potència límit, a partir de la qual ja no amplifica. Com el *coupler* utilitzat és del 50%, quan es deixa d'amplificar la transmissivitat és propera a zero en els trams

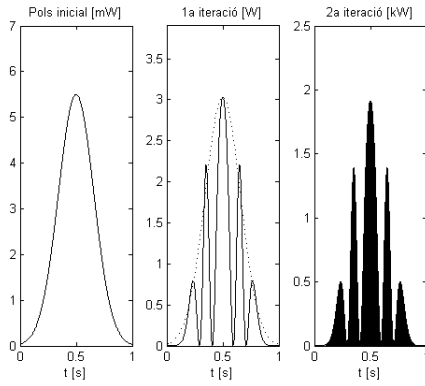


Figura 4. Divisió d'un pols gaussià després de passar dues vegades pel NALM

del pols que hagin arribat a la potència límit i el sistema deixa de dividir més els polsos. En global, aquests fets fan que el làser sigui bastant inestable i molt dependent de les condicions inicials per a altes potències podent derivar en un comportament caòtic. El sistema doncs és difícilment simulable i les escales de temps dels polsos influeixen afegint molt soroll numèric que fa que els resultats s'allunyin molt de la realitat. És per aquest motiu que no s'inclou una simulació numèrica més enllà dels resultats d'un NALM ideal ja mostrats en les figures anteriors.

IV. DIODE LASER AND PID CONTROL

Finalment, abans del muntatge, només queda dissenyar el control del làser de bombeig utilitzant un díode làser. Aquest, utilitza les recombinacions que es produeixen entre dos semiconductors P i N per produir llum. Al aplicar corrent a una unió PN estem injectant electrons i forats a la part central del díode, on es recombinen i emeten un fotó cada cop, d'energia igual al gap del semiconductor. Amb un tipus determinat de semiconductor podem aconseguir llum amb una longitud de 980 nm que servirà per alimentar la fibra dopada amb erbi (Er^{+3}).

Un problema amb els díodes làser és que la longitud d'ona emesa no es estable. La dissipació de potència per el corrent de bombeig, entre altres coses, fa augmentar la temperatura del semiconductor, que al seu torn produeix canvis en el espectre d'emissió derivant a un canvi en la longitud d'ona emesa. Això no ens interessa, perquè si ens allunyem del pic d'absorció de l'Erbi, la seva eficiència baixarà. L'amplitud de la llum làser dins de la fibra també pot patir variacions, i ens interessa que es mantingui dins d'un rang acceptable. Per controlar que la temperatura es mantingui estable implementarem un control PID.

Molts díodes làser venen amb una cèl·lula Peltier, que permet refredar o escalfar l'aparell al injectar corrent. La idea de funcionament és utilitzar electrons com transpor-

tadors de calor entre un objecte i una referència. La nostra referència serà l'encapsulament del díode làser, que al ser més gran i estar en contacte directe amb l'exterior podem suposar que es mantindrà a temperatura ambient de manera constant. Per fer un seguiment de la temperatura utilitzarem un termistor integrat dins el díode. Un termistor és una resistència que varia amb la temperatura, en el nostre cas, conforme la següent llei:

$$T = \left[\frac{1}{T_o} - \frac{1}{B} \ln\left(\frac{R}{R_o}\right) \right]^{-1} \quad (8)$$

$B[K]$, $T_o[K]$ and $R_o[\Omega]$ son constants conegudes. Amb un divisor de tensions podem obtenir la resistència, i utilitzant l'equació 8 la temperatura. Utilitzant un transistor podem amplificar la intensitat donada per el arduino i alimentar la cèl·lula Peltier, tancant així el sistema de control. Com hem dit abans, utilitzarem un sistema PID per controlar l'aparell, que utilitza com a entrada l'error entre el que mesurem i una referència, en el nostre cas la temperatura ambient. Consta de tres parts: la part proporcional (k_p), que produeix una resposta proporcional a l'error; la part integral (k_o), que suma totes les entrades rebudes permetent fer correccions al error d'estat estacionari; i la part derivativa (k_d), que estima una derivada del error, ajudant a predir el comportament del sistema i reduint així problemes de sobreimpuls.

El que fem és sumar tots tres valors (ponderats amb les seves respectives constants) i aplicar-ho al sistema. Això es pot fer amb llibreries de Arduino/MATLAB/Simulink. Com el nostre sistema és de resposta lenta, amb un control PI és suficient per mantenir la temperatura estable. Per determinar les constants k_p i k_i utilitzem un mètode empíric conegut com *Regla de la Corba de Reacció*, que es basa en la resposta esglaó del sistema per trobar tres valors k , τ_o i τ , representats a la figura ???. Els valors obtinguts han sigut 7.5, 0.105 i 0.75 respectivament. El mètode ens diu que per tant les constants que hem d'utilitzar son: $k_p = 0.9\tau/k\tau_o = 0.86$ i $k_i = k_p/2\tau_o = 4.08$. Amb aquest paràmetres es completa el disseny del sistema de control que asseguri un funcionament correcte de l'alimentació del làser de fibra.

V. MUNTATGE I RESULTATS

Per tal de dur a terme el muntatge del làser, es va haver de pensar en la forma més ideal de satisfer les característiques desitjades de versatilitat i compactabilitat. Tot i tractar-se d'un prototip s'ha buscat d'encabir el sistema làser (amb excepció de la font de bombeig, que en futures versions també s'inclourà en un disseny encara més compacte) dins una capsa metàl·lica de dimensions reduïdes de $50 \times 30 \times 15cm$ que atorga robustesa i protecció als diferents components. Tal i com s'ha esmentat les diferents connexions han estat pensades per ser realitzades de forma final amb soldadura tèrmica, però per realitzar la construcció del prototip s'han dut a terme acoblant connectors FC ideats per fibra *single-mode*

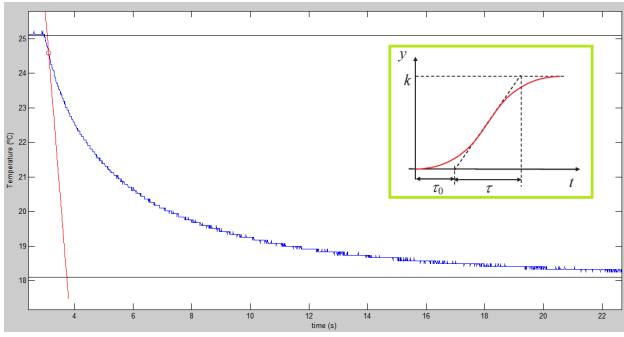


Figura 5. A dalt a la dreta tenim un model de corba resposta d'esglaó amb les constants especificades. Hem obtingut els valors seguint el mateix procés però utilitzant la nostra corba de refredament (en blau), que és la resposta a una entrada de 0.25V

degut a la facilitat que atorga en l'acoblament de les diferents parts a l'hora de muntar el prototip tot i la possible atenuació (no massa elevada) introduïda, a més del benefici de poder introduir canvis de forma relativament simple.

1. Connectors FC

Els connectors FC ens permeten fer les unions amb més agilitat per tal de reemplaçar parts o detectar errors. S'han utilitzat connectors ja muntats de fàbrica per evitar errors que derivin en un excés de pèrdues i s'han fusionat als diferents components. El procés es basa en retirar la coberta plàstica de les fibres i el revestiment de $950\mu m$ i el de $250\mu m$ utilitzant una peladora de precisió per tal de deixar al descobert el material a fusionar (nucli i primer revestiment), netejar les fibres amb alcohol isopropílic, tallar-les amb un tallador de precisió que deixi talls nets amb angles de 90° i fusionar-les utilitzant la fusionadora, amb la fita d'obtenir fusions amb atenuacions de $0.01dB$ (el mínim possible).

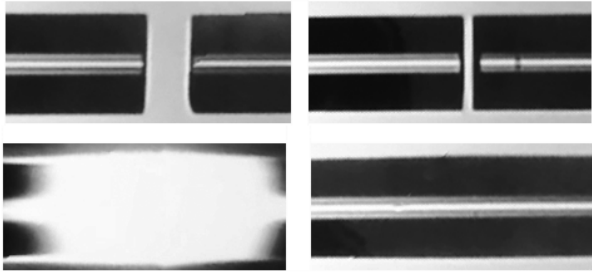


Figura 6. D'esquerra a dreta i de dalt a baix el procés de soldadura d'una fibra convencional. Es pot veure l'alineació de les fibres, la descàrrega de l'arc voltaic i el resultat, en aquest cas amb $0.01dB$ de pèrdues.

Els diferents components que formen el làser han estat muntats i protegits mitjançant coixinets d'espuma per

evitar danys i fixats mitjançant fils plàstics i adhesiu per fer més fàcil la substitució de qualsevol part.

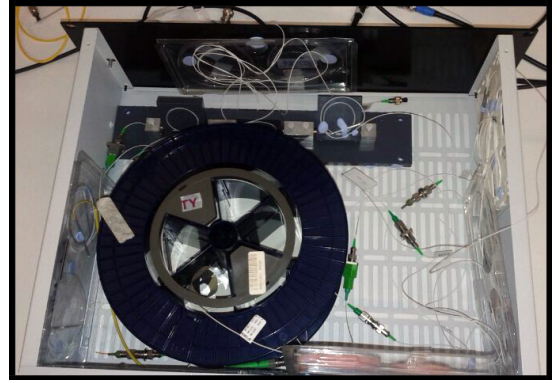


Figura 7. Caixa de muntatge.

El la figura 6 es pot veure com els diferents components estan adherits a les parets de la caixa de muntatge, excepte els $2km$ de fibra que proporcionen la no linearitat (*efecte kerr*), que està al centre de la caixa, juntament amb el controlador de polarització. Cal a dir que, aquesta, ha estat la peça que més problemes ha donat. Degut a un mal disseny, va malmetre la fibra òptica, cosa que va dificultar obtenir mesures satisfactòries del funcionament del làser.

Un ajust de la polarització adequat tot observant la senyal de sortida del dispositiu fent ús d'un oscil·loscopi convencional amb un convertidor ha permès obtenir uns resultats esperançadors però que no han arribat a complir les ambicioses expectatives inicials. Algun error encara no corregits per falta de temps han comportat unes pèrdues importants en el cos del làser, fent que l'espectre d'emissió sigui més limitat del desitjat (fig. 7).

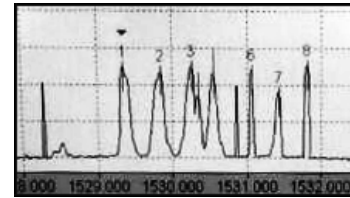


Figura 8. Espectre del senyal de sortida del làser.

Un espectre de tan sols $6nm$ fa que l'amplada dels polsos no sigui inferior als $100ps$ i que a més mostri un comportament inestable que dificulta una mesura precisa.

A. Millores al disseny

Existeixen diferents aspectes a millorar en el disseny, que no s'han dut a terme bé per falta de temps per pensar, dissenyar i provar els sistemes, bé per falta de materials, però que es volen fer constar per a futures millores.

En primer lloc, pot ser interessant reaprofitar el bombeig excendent i per aconseguir-ho, s'ha pensat en fer entrar el bombeig per un extrem de l'EDFA i fer-lo sortir per l'altre per fer entrar de nou l'excés tot tenint controlada la fase per evitar interferències destructives entre el bombeig nou i el residual, dificultat que ha fet no intentar aquest sistema. Tot i així, aquest sistema juntament amb una font de bombeig més potent podrien fer una làser molt més eficient i potent.

La utilització de fibra no lineal, amb un alt coeficient Kerr, també seria una bona millora, tot reduint la longitud de la fibra utilitzada al NALM, evitant pèrdues per

atenuació i disminuint l'efecte dispersiu en combinació amb fibra amb GDD negatiu. Però, en aquest cas, tot i disposar d'una certa quantitat de fibra no lineal, no s'ha dut a terme la seva implementació per la dificultat que introdueix la seva manipulació en el procés de fusionat degut a les diferències entre les dues fibres (estàndard i cristall fotònic). L'estructura interna del cristall fotònic dificulta enormement la seva fusió. Una forma alternativa de poder fer ús del cristall fotònic sense haver de fer fusió tèrmica és mitjançant la fusió mecànica, però que es va descartar perquè impossibilitaria la mobilitat del làser.

-
- [1] SHUSEN XIE, YU CHEN, HENGCHANG GUO ET AL. *Recent advances in two-photon imaging: technology developments and biomedical applications*, Chinese Optics Letters, January 10, 2013, COL201311.011703.
 - [2] C. XU AND F. W. WISE *Recent advances in fibre lasers for nonlinear microscopy*, Nature Photonics, published online October 20, 2013, DOI: 10.1038/NPHOTON.2013.284.
 - [3] SALEH, B.E.A.; TEICH, M.C *Fundamentals of photonics* 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2007. ISBN 978-0-471-35832-9
 - [4] P.C. BECKER, N.A. OLSSON, J.R. SIMPSON *Erbium-Doped Fiber Amplifiers: Fundamentals and Technology* 1st ed. March 22, 1999. ISBN-13: 978-0120845903
 - [5] R. VICTOR JONES The Interaction of Radiation and Matter: Semiclassical Theory: http://people.seas.harvard.edu/~jones/ap216/lectures/ls_2/ls2_u5/ls2_unit_5.html
 - [6] MICHEL J. F. DIGONNET, *Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifier*, Second Edition (Revised and expanded), Marcel Dekker, pp.408-414, New York, 2001.
 - [7] M. J. GUY, D. U. NOSKE and J. R. TAYLOR, *Generation of femtosecond soliton pulses by passive mode locking of an ytterbium-erbium figure-of-eight fiber laser*, OPTICS LETTERS, Vol. 18, No. 17, September 1993.
 - [8] M. SALHI, H. LEBLOND, A. HABOUCHE and F. SANCHEZ, *Theoretical study of figure-eight all-fiber laser*, PHYSICAL REVIEW A 77, 033828, 2008.
 - [9] IRL N. DULING III, *All-fiber ring soliton laser mode locked with a nonlinear mirror*, Naval Research Laboratory, Washington, D.C. 20375, OPTICS LETTERS, Vol. 16, No. 8, 1991.
 - [10] N. J. DORAN and DAVID WOOD, *Nonlinear-optical loop mirror*, Optical Society of America, OPTICS LETTERS, Vol. 13, No. 1, 1988.
 - [11] LE NGUYEN BINH and NAM QUOC NGO, *Ultra-Fast fiber lasers. Principles and Applications with Matlab Models*, CRC Press, pp.267-292, 2011.